

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190908

## 基于 RTDS 硬件在环测试的 SVG 控制器参数辨识

夏天华<sup>1</sup>, 马骏超<sup>2</sup>, 黄弘扬<sup>2</sup>, 彭琰<sup>2</sup>, 肖修林<sup>3</sup>, 陈皓<sup>3</sup>, 郭瑞鹏<sup>4</sup>

(1. 浙江大学工程师学院, 浙江 杭州 310015; 2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014;  
3. 杭州意能电力技术有限公司, 浙江 杭州 310014; 4. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 静止无功发生器(Static Var Generator, SVG)对故障后电力系统的动态特性具有重要作用, 准确的 SVG 控制器参数是含电力电子设备的电力系统暂态仿真分析的关键。提出一种基于 RTDS 硬件在环测试的 SVG 控制器参数辨识方法。该方法通过搭建 SVG 控制器-RTDS 硬件在环试验系统, 将测试得到的 SVG 响应数据作为实测数据, 对于不同的控制器参数组合, 采用 BPA 软件进行暂态仿真, 根据暂态仿真结果与实测数据的最小二乘指标进行参数辨识。通过对某实际 SVG 控制器的硬件在环试验验证了所提方法的正确性及有效性, 能够较好地满足实际电力系统暂态仿真的应用要求。

**关键词:** 静止无功发生器; 参数辨识; RTDS 硬件在环试验; 暂态仿真; BPA

### Parameter identification for SVG controller based on RTDS hardware-in-the-loop test

XIA Tianhua<sup>1</sup>, MA Junchao<sup>2</sup>, HUANG Hongyang<sup>2</sup>, PENG Yan<sup>2</sup>, XIAO Xiulin<sup>3</sup>, CHEN Hao<sup>3</sup>, GUO Ruipeng<sup>4</sup>

(1. College of Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China; 3. Hangzhou Yineng Power Technology Co., Ltd., Hangzhou 310014, China;  
4. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The Static Var Generator (SVG) plays a significant role in the dynamic characteristics of power systems after large disturbances. The accuracy of the SVG controller parameters is the key to transient simulation of power systems with power electronic equipment. This paper presents a parameter identification method for an SVG controller based on RTDS hardware-in-the-loop test. This method establishes the SVG controller-RTDS hardware-in-the-loop test system to obtain the SVG response data as the measured data. For different combinations of controller parameters, BPA software is used for transient simulation, and parameter identification is based on the Least Squares (LS) index of transient simulation results and measured results. The correctness and effectiveness of the proposed method are verified by the hardware-in-the-loop test of an actual SVG controller, which can better meet the application requirements of the actual power system transient simulation.

This work is supported by Science and Technology Project of Zhejiang Province (No. 2019C01149) "Key Technologies Research and Application of Intelligent Regulation and Control of Distributed Network Oriented Integrated Energy Interconnection" and Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. (No. 5211DS180031).

**Key words:** static var generator; parameter identification; RTDS hardware-in-the-loop test; transient simulation; BPA

## 0 引言

近年来, 静止无功发生器(Static Var Generator,

SVG)被广泛应用于输电网、配电网和新能源发电等领域, 不断加剧我国电网的复杂化。电力系统稳-暂态仿真分析作为分析电网运行特性和优化控制的基础, SVG 暂态模型的正确性影响着仿真计算的准确度和可信度<sup>[1-2]</sup>。

控制器作为 SVG 成套装置的关键设备, 其模型及参数决定了电网发生扰动时 SVG 的暂态响应特

基金项目: 浙江省科技计划项目资助(2019C01149)“面向综合能源互联的分布式配电网智能调控关键技术研究与应用”;  
国网浙江省电力有限公司科技项目资助(5211DS180031)

性。但是, 实际上多数制造商因为知识产权保护或缺乏测试技术等原因, 无法提供准确的模型和参数。在电网暂态仿真计算时只能采用典型模型及参数, 其精度难以准确仿真实际电网的动态特性。目前, 国内外学者对 SVG 控制策略进行了大量的研究。文献[3]采用 PQ 分解算法、PI 控制, 实现了 SVG 无功功率控制和直流侧电容电压控制; 文献[4]基于逆系统方法设计了有功-无功解耦 PWM 控制策略, 可显著提高 SVG 无功响应速度; 文献[5]提出的无差拍控制方法具有控制精度高、动态响应快等优点, 但须对控制模型参数进行自修正; 文献[6-8]设计的 SVG 控制器同时具有 AVR(自动电压调节)、PSS(阻尼系统振荡控制)、AQR(自动无功控制)等多目标控制功能。关于 SVG 控制器参数辨识问题的研究较少, 文献[9-10]利用最小二乘法对 SVG 连接电抗器的  $R$ 、 $L$  参数进行在线估计以自适应修正控制模型, 提高了补偿精度。

参数辨识问题需要获取输入、输出数据, 进而对模型参数进行辨识。实时数字仿真器(Real Time Digital Simulator, RTDS)能够实时模拟电力系统的暂态过程, 通过 I/O 接口与物理控制器连接进行闭环试验<sup>[11-14]</sup>。文献[15]利用 RTDS 搭建了 520 kWp 光伏并网系统的硬件在环仿真平台。文献[16]通过 RTDS 与实际直流输电控制保护装置的闭环仿真试验, 获得了实际故障过程的扰动数据。南方电网总结了实践中大功率电力电子装置 RTDS 建模和控制系统闭环测试结果<sup>[17-20]</sup>。大量研究实践表明 RTDS 硬件在环试验能够真实再现故障时刻电网的实际运行状况, 故可把 RTDS 测试获得的动态响应数据当作实测数据用于参数辨识, 同时避免了现场在线数据测量中工况难以模拟, 条件受限等问题。

针对 SVG 控制器参数辨识问题, 借助 RTDS 实时数字仿真平台, 本文提出一种基于 RTDS 硬件在环测试的参数辨识方法。首先, 搭建 SVG 控制器-RTDS 硬件在环试验平台, 测得多种工况下 SVG 响应数据。然后, 采用 BPA 软件对不同的控制参数组合进行暂态仿真, 并根据暂态仿真结果与 RTDS 测试结果的最小二乘指标进行参数辨识。结果表明: 提出的参数辨识方法能够准确地辨识出 SVG 控制参数, 满足电力系统暂态仿真的精度要求。

## 1 SVG 逆变器及其控制器模型

### 1.1 SVG 逆变器

SVG 逆变器结构如图 1 所示。SVG 逆变器采用了电压型桥式电路, 经连接电抗器或变压器并入系统。通过控制器控制开关器件(IGBT 等)的通断, 调整输出电压的幅值、频率和相位, 从而实现多目标控制功能。SVG 具有空载、容性、感性 3 种运行模式。图 1 中,  $C$  为直流电容,  $v_{dc}$  为直流电容电压,  $V_i$  为逆变器输出电压,  $V_s$  为系统电压,  $I$  为逆变器输出电流,  $L$ 、 $R$  为连接电抗器的等值电感和电阻。

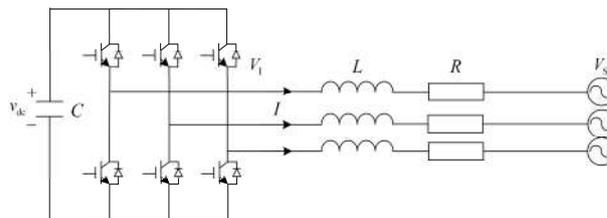


图 1 SVG 逆变器

Fig. 1 SVG converter

### 1.2 SVG 控制器模型

本文采用中国电科院 PSD-BPA 暂态稳定程序中的 SVG 控制器模型<sup>[21]</sup>, 如图 2 所示。该控制器

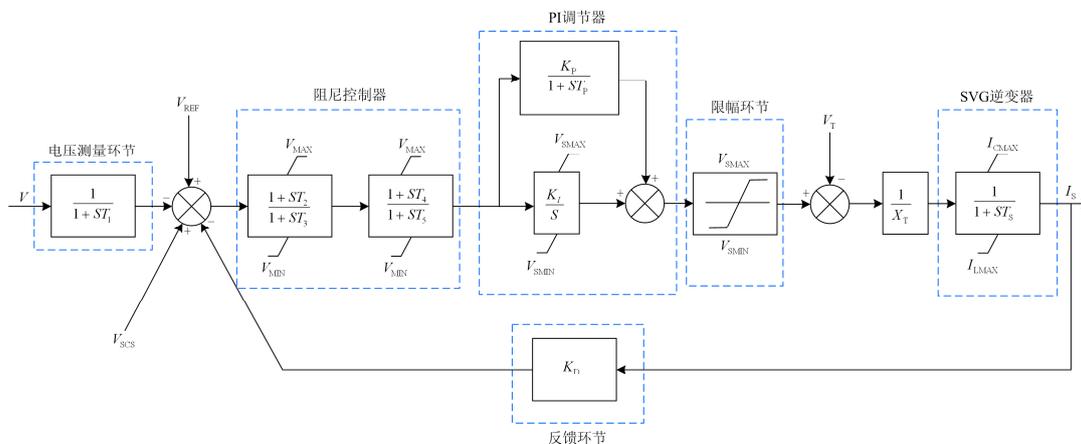


图 2 SVG 控制器模型

Fig. 2 Model of SVG controller

模型由电压测量环节、阻尼控制器、PI 调节器、保护和限幅环节、SVG 逆变器以及反馈环节构成, 采用电压闭环控制, 根据电压指令控制目标侧母线电压从而快速调整 SVG 输出的无功功率。

图 2 中,  $V$  为 SVG 输出端电压;  $V_{\text{REF}}$  为参考电压;  $V_{\text{SCS}}$  为辅助信号;  $V_{\text{T}}$  为系统侧电压;  $I_{\text{S}}$  为 SVG 输出电流;  $T_1$  为滤波器和测量回路的时间常数;  $T_2, T_3, T_4, T_5$  分别为超前-滞后时间常数;  $K_p$  为比例系数;  $T_p$  为比例环节时间常数;  $K_i$  为积分系数;  $X_{\text{T}}$  为 SVG 与系统之间的等值电抗;  $T_s$  为 SVG 触发时延;  $K_D$  为 SVG 的  $V-I$  特性曲线的斜率, 大于或等于 0;  $V_{\text{MAX}}$ 、 $V_{\text{MIN}}$  分别为电压限幅环节的上、下限;  $I_{\text{CMAX}}$ 、 $I_{\text{LMAX}}$  分别为最大容性电流、最大感性电流。

针对串联补偿引起的电力系统次同步谐振 (Subsynchronous Resonance, SSR)<sup>[22-24]</sup>, SVG 控制器中阻尼控制器采用 2 个带非终端限制(non-windup)的超前-滞后环节同时实现提高第一摆稳定性和阻尼系统振荡的目的<sup>[25]</sup>。因存在测量回路中滤波器的时间延迟以及 SVG 触发的固有延迟, 利用超前-滞后环节对这些延迟进行相位补偿, 使得 SVG 在系统发生大的扰动面前, 能快速有效响应并减少扰动恢复时间。PI 调节器的传递函数为

$$G_1(s) = \frac{K_p}{1+sT_p} + \frac{K_i}{s} \quad (1)$$

对于晶体管运算放大器, 由于其动态响应快, 一般可近似认为式(1)中  $T_p = 0$ 。PI 调节器的输出与  $V_{\text{T}}$  的差在等值电抗  $X_{\text{T}}$  上产生电流, 经 SVG 逆变器  $\frac{1}{1+sT_s}$  输出  $I_{\text{S}}$ 。受逆变器直流侧电容容量和过流保护的影响, 控制器设置了电压、电流限幅环节。其输出的感性无功电流和容性无功电流均有最大限制:  $-I_{\text{LMAX}} \leq I \leq I_{\text{CMAX}}$ 。PI 调节器输出的限幅  $V_{\text{SMAX}}$  和  $V_{\text{SMIN}}$  的计算公式如下:

$$\begin{aligned} V_{\text{SMAX}} &= V_{\text{T}} + X_{\text{T}} \cdot I_{\text{CMAX}} \\ V_{\text{SMIN}} &= V_{\text{T}} - X_{\text{T}} \cdot I_{\text{LMAX}} \end{aligned} \quad (2)$$

在对 PI 调节器输出进行限幅的情况下, 控制系统实际上存在饱和特性及功率限制<sup>[26]</sup>, 因此积分环节带有非终端限制型限幅环节。根据图 2 的传递函数框图可见, SVG 控制器模型的待辨识参数为

$$\alpha = [T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, K_p, T_p, K_i, X_{\text{T}}, T_s, K_D, V_{\text{MAX}}, V_{\text{MIN}}, I_{\text{CMAX}}, I_{\text{LMAX}}] \quad (3)$$

不考虑辅助信号  $V_{\text{SCS}}$  和限幅环节, 列出 SVG 控制器的微分方程:

$$\begin{cases} \frac{dV_{\text{T1}}}{dt} = \frac{1}{T_1}(V - V_{\text{T1}}) \\ \frac{d(T_3V_{\text{T23}} + T_2V_{\text{T1}} + T_2K_D I_{\text{S}})}{dt} = V_{\text{REF}} - V_{\text{T1}} - V_{\text{T23}} - K_D I_{\text{S}} \\ \frac{d(T_4V_{\text{T23}} - T_5V_{\text{T45}})}{dt} = V_{\text{T45}} - V_{\text{T23}} \\ \frac{dV_{\text{p}}}{dt} = \frac{1}{T_p}(K_p V_{\text{T45}} - V_{\text{p}}) \\ \frac{dV_{\text{i}}}{dt} = K_i V_{\text{T45}} \\ \frac{dI_{\text{S}}}{dt} = \frac{1}{T_s X_{\text{T}}}(V_{\text{p}} + V_{\text{i}} - V_{\text{T}}) - \frac{1}{T_s} I_{\text{S}} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $V_{\text{T1}}$  为电压测量环节的输出;  $V_{\text{T23}}$  为第一级超前-滞后环节的输出;  $V_{\text{T45}}$  为第二级超前-滞后环节的输出;  $V_{\text{p}}$  为比例环节的输出;  $V_{\text{i}}$  为积分环节的输出;  $I_{\text{S}}$  为 SVG 输出电流。

## 2 SVG-RTDS 硬件在环试验

本节首先在 RTDS 中建立了仿真系统和 SVG 逆变器模型, 然后搭建了 SVG 控制器-RTDS 的硬件在环试验平台, 在此基础上测试多种工况下的 SVG 响应数据。被测试 SVG 装置的额定电压为 35 kV, 额定容量为  $\pm 30$  Mvar。该 SVG 控制器支持 5 类控制模式: 定 SVG 无功、定并网点无功、定电压、定功率因数和无功电压综合控制模式, 本节以定电压控制模式为例进行介绍。

### 2.1 系统建模

仿真系统如图 3 所示, 220 kV 等值机组为无穷大电源, 主变额定容量为 100 MVA, 额定电压为 220 kV。SVG 通过连接电抗器并入 35 kV 母线(B2)。SVG 控制目标为维持并网点 35 kV 母线(B2)电压恒定。

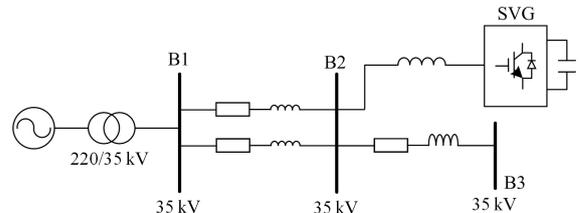


图 3 仿真系统

Fig. 3 Simulation system

### 2.2 硬件在环试验平台

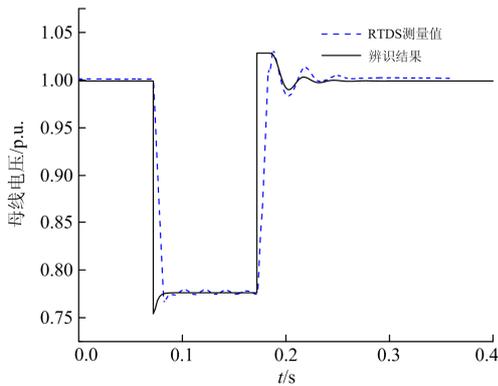
SVG 控制器-RTDS 硬件在环试验平台如图 4 所示。在 RTDS 实时数字仿真软件 RSCAD 中, 有



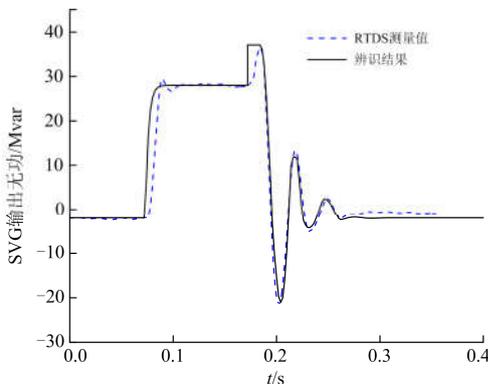
从表 1 可以看出, 各参数取值范围较大, 需选择合理的步长进行最小二乘辨识。其中, 进行暂态仿真时, SVG 控制器模型中的阻尼控制器通常不使用, 故超前-滞后环节参数  $T_2, T_3, T_4, T_5$  都取 1 s; SVG 与系统之间的等值电抗  $X_T$  采用原始设备制造商(Original Equipment Manufacturer, OEM)提供的数据; 为验证参数辨识得到的 SVG 控制器模型参数是否与实际工况一致, 通过 BPA 软件对模型参数进行仿真验证。

在 BPA 软件中建立与 RTDS 测试环境相同的仿真系统, 如图 3。初始时刻系统稳定运行, 系统基准容量指定为 100 MVA。扰动设置为在 B2 处投入一组并联电抗器, 模拟经阻抗接地造成三相短路故障, 投入后 0.1 s 切除。设置 4 组投切电抗值分别为 0.02 p.u.、0.01 p.u.、0.005 p.u.、0.002 p.u., 记录不同电压跌落工况下母线电压、SVG 输出无功及输出电流响应曲线。下面给出电抗值取 0.01 p.u. 时采用辨识参数的仿真结果曲线和 RTDS 测量曲线比较, 如图 6 所示。

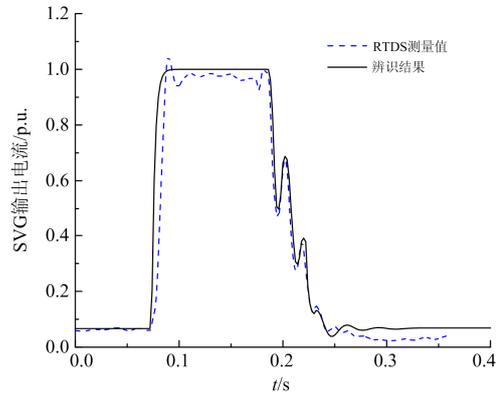
从图 6(a)和图 6(b)可见, 母线电压和 SVG 输出无功的辨识结果与 RTDS 测量值基本吻合。图 6(a)的母线电压响应曲线显示, 投入电抗后, 母线电压迅速跌落至 0.78 p.u., 切除电抗后, 母线电压迅速恢复到稳态运行状态。在 RTDS 测试中, 电压跌落



(a) 母线电压的辨识结果和测量值比较



(b) SVG输出无功功率的辨识结果和测量值比较



(c) SVG输出电流的辨识结果和测量值比较

图 5 母线电压跌落至 0.78 p.u., 辨识参数的仿真结果和 RTDS 测量结果比较

Fig. 5 Comparison between identification parameters simulation results and RTDS measurements when bus voltage drops to 0.78 p.u.

和恢复时间在不同工况下均为 0.01 s, 而 BPA 软件自身将电压跌落和恢复过程时间忽略不计, 导致两者曲线拟合上存在差异; 图 6(b)的输出无功曲线显示, RTDS 测试结果中 SVG 在母线电压恢复后, 由于锁相环(PLL)不可避免的延时导致其对系统产生瞬时无功冲击且该暂态无功冲击随电压跌落程度加深而变大, 而 BPA 仿真结果中的无功冲击来自于滤波器和测量回路时间常数  $T_1$ , 因此在此暂态过程存在偏差。图 6(c)的 SVG 输出电流曲线说明 SVG 装置向系统输出容性电流期间, 电流限幅环节的参数  $I_{C\text{MAX}}$  起作用, 将最大输出电流限制在 1.0 p.u.。

表 2 不同工况下的参数辨识误差

Table 2 Parameter identification error under different working conditions

工况	投切电抗值/p.u.	电压跌落至深度/p.u.	目标函数	平均辨识误差/%
1	0.02	0.88	0.103	1.031
2	0.01	0.78	0.311	1.728
3	0.005	0.60	0.978	3.106
4	0.002	0.40	1.667	3.696

进一步给出不同工况下的目标函数和平均辨识误差, 列于表 2 中。平均辨识误差通过辨识结果曲线和 RTDS 测量曲线计算得出。由表 2 数据所示, 不同工况下的平均辨识误差均小于 5%, 其辨识误差主要来源于故障初期的电压跌落时间以及电压恢复后的暂态特性。对比不同工况发现, 随母线电压跌落深度加大, 目标函数和平均辨识误差均增大,

这是因为电压恢复后暂态无功冲击随电压跌落程度加深而变大。较小的目标函数和平均辨识误差也说明,提出的方法能够有效地处理 SVG 控制器参数辨识问题,满足电力系统暂态仿真计算的精度要求。

## 5 结论

针对 SVG 控制器的参数辨识问题,本文提出了一种基于 RTDS 硬件在环测试的参数辨识方法。该方法通过搭建 SVG 控制器-RTDS 硬件在环试验平台,对多种工况下的 SVG 输出响应进行在环测试,获得响应数据。将 RTDS 硬件在环试验获得的响应数据当作量测数据,采用最小二乘指标实现 SVG 控制器的参数辨识。不同母线电压跌落工况下的辨识结果和 RTDS 半实物测试结果比较表明,所提出的方法能够准确辨识 SVG 控制器参数,辨识结果满足电力系统暂态仿真的精度要求。

## 参考文献

- [1] 孙元章, 刘前进. FACTS 控制技术综述——模型、目标与策略[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(6): 1-7.  
SUN Yuanzhang, LIU Qianjin. Overview of FACTS control technology——model, target and strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(6): 1-7.
- [2] POURBEIK P, SULLIVAN D J, BOSTROM A, et al. Generic model structures for simulating static var systems in power system studies—a WECC task force effort[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1618-1627.
- [3] PENG F Z, LAI J S. Dynamic performance and control of a static var generator using cascade multilevel inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Application, 1997, 33(3): 748-755.
- [4] 魏文辉, 刘文华, 宋强, 等. 基于逆系统方法有功—无功解耦 PWM 控制的链式 STATCOM 动态控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 25-30.  
WEI Wenhui, LIU Wenhua, SONG Qiang, et al. Study on dynamic control strategy of chain STATCOM based on active-reactive decoupling PWM control based on inverse system method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 25-30.
- [5] KAWAMURA A, HANEYOSHI T, HOFT R G. Deadbeat controlled PWM inverter with parameter estimation using only voltage sensor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1988, 3(2): 118-126.
- [6] MORI S, MATSUNO K, HASEGAWA T, et al. Development of a large static var generator using self-commutated inverter for improving power system stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(1): 371-377.
- [7] 姜齐荣, 刘文华, 韩英铎, 等.  $\pm 20$  Mvar STATCOM 控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(23): 24-28.  
JIANG Qirong, LIU Wenhua, HAN Yingduo, et al. Design of  $\pm 20$  Mvar STATCOM controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(23): 24-28.
- [8] 李春华, 黄伟雄, 袁志昌, 等. 南方电网  $\pm 200$  Mvar 链式 STATCOM 系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 116-121.  
LI Chunhua, HUANG Weixiong, YUAN Zhichang, et al. Control strategy of  $\pm 200$  Mvar chain STATCOM system in China Southern Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 116-121.
- [9] 伏祥运, 王建曠, 纪延超, 等. 静止坐标系下 D-STATCOM 自适应无差拍控制[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(8): 41-45.  
FU Xiangyun, WANG Jianze, JI Yanchao, et al. Adaptive deadbeat control in stationary reference frame for D-STATCOM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(8): 41-45.
- [10] 李宁宁, 王建曠, 纪延超, 等. STATCOM 预测直接功率控制中参数自适应辨识方法[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 40-46.  
LI Ningning, WANG Jianze, JI Yanchao, et al. STATCOM predictive parameter adaptive identification method in direct power control[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 40-46.
- [11] DINAHAHI V R, IRAVANI M R, BONERT R, et al. Real-time digital simulation of power electronic apparatus interfaced with digital controllers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4): 775-781.
- [12] LIU X, AICHHORN A, LIU L, et al. Coordinated control of distributed energy storage system with tap changer transformers for voltage rise mitigation under high photovoltaic penetration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2): 897-906.
- [13] PARK M, YU I K. A novel real-time simulation technique of photovoltaic generation systems using RTDS[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(1): 164-169.
- [14] 王伟. 特高压直流输电控制保护系统实时仿真技术的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 1-6.  
WANG Wei. Research and application of real-time

- simulation technology for UHVDC transmission control and protection system[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(15): 1-6.
- [15] 陈侃, 冯琳, 贾林壮, 等. 基于 RTDS 的光伏并网数字物理混合实时仿真平台设计[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(3): 42-48.
- CHEN Kan, FENG Lin, JIA Linzhuang, et al. Design of photovoltaic grid-connected digital physics hybrid real-time simulation platform based on RTDS[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(3): 42-48.
- [16] 贾旭东, 李庚银, 赵成勇, 等. 基于 RTDS 的交直流混合系统实际故障再现分析[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(10): 54-58.
- JIA Xudong, LI Gengyin, ZHAO Chengyong, et al. Real-time simulation studies of actual faults in AC/DC power system based on RTDS[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(10): 54-58.
- [17] 黄伟雄, 胡广振, 王永源, 等. 南方电网 35 kV  $\pm 200$  Mvar 链式 STATCOM 现场试运行[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(19): 122-130.
- HUANG Weixiong, HU Guangzhen, WANG Yongyuan, et al. On-site commissioning of 35 kV $\pm 200$  Mvar cascade STATCOM in China Southern Power Grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(19): 122-130.
- [18] 谢化安, 王永源, 万四维, 等. 东莞变电站链式 STATCOM 控制保护的 RTDS 试验研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(4): 117-122.
- XIE Hua'an, WANG Yongyuan, WAN Siwei, et al. RTDS test study on chain STATCOM control protection of Dongguan Substation[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(4): 117-122.
- [19] 谢伟, 崔勇, 冯煜尧, 等. 上海电网 220 kV 统一潮流控制装置示范工程应用效果分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(6): 136-142.
- XIE Wei, CUI Yong, FENG Yuyao, et al. Analysis of application effect of 220 kV UPFC demonstration project in Shanghai Grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(6): 136-142.
- [20] 张建设, 韩伟强, 张尧, 等. 含 $\pm 800$  kV 云广直流的南方电网交直流系 RTDS 仿真研究[J]. *南方电网技术*, 2009, 3(1): 32-35.
- ZHANG Jianshe, HAN Weiqiang, ZHANG Yao, et al. RTDS simulation on AC/DC hybrid CSG with the  $\pm 800$  kV Yunnan-Guangdong UHVDC transmission system in operation[J]. *Southern Power System Technology*, 2009, 3(1): 32-35.
- [21] 中国电力科学研究院. PSD-ST 暂态稳定程序用户手册[Z]. 5.0. 2015.
- [22] PADIYAR K R, PRABHU N. Design and performance evaluation of subsynchronous damping controller with STATCOM[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, 21(3): 1398-1405.
- [23] ROSTAMKOLAI N, PIWKO R J, LARSEN E V, et al. Subsynchronous interaction with static var compensators-concepts and practical implications[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1990, 5(4): 1324-1332.
- [24] EL-MOURSIS M S, BAK-JENSEN B, ABDEL-RAHMAN M H. Novel STATCOM controller for mitigating SSR and damping power system oscillations in a series compensated wind park[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, 25(2): 429-441.
- [25] DICKMANDER D L, THORVALDSSON B H, STROMBERG G A, et al. Control system design and performance verification for the Chester, Maine static Var compensator[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1992, 7(3): 1492-1503.
- [26] HIPPE P. Windup in control: its effects and their prevention[M]. London: Springer-Verlag, 2006.

收稿日期: 2019-07-28; 修回日期: 2019-12-03

作者简介:

夏天华(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源场站等值建模与参数辨识; E-mail: 21760545@zju.edu.cn

马骏超(1989—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为新能源涉网安全与能量管理。

(编辑 姜新丽)